

MEMO No CFD/THERMO-45-2004

DATE: 2nd February 2004

## TITLE

Laser-Doppler anemometer measurements of air flow between cooling ribs of an electrical motor.

## AUTHOR(S)

Kari Saari

## ABSTRACT

Two dimensional air flow velocities and turbulence parameters between cooling ribs of an electrical motor were measured using a laser-Doppler anemometer. Both the electrical motor and the air flow between the cooling ribs were approximately at the ambient temperature.

## MAIN RESULTS

The axial air velocity decreases substantially from 19 m/s to 8...9 m/s while flowing through the cooling rib channel. Also the kinetic energy of turbulence has a rapid decrease along the flow channel.

## PAGES

22

## KEY WORDS

Cooling rib, electrical motor, laser-Doppler anemometer, velocity, turbulence

## APPROVED BY

Timo Siikonen

2nd February 2004

## 1. JOHDANTO

Sovelletun termodynamiikan laboratoriossa mitattiin syksyn 2002 ja talven 2003 aikana laser-Doppler anemometrillä ABB:n toimittaman sähkömoottorin jäähdytysripojen välistä ilmavirtauksia. Työn tarkoituksena oli mitata ilmavirtauksen nopeusjakautumat ja turbulenssisuureita. Työ tehtiin Sovelletun termodynamiikan laboratoriohallissa, johon oli rakennettu vanerista koehuone joka oli 2,4 metriä korkea, 3,6 metriä pitkä ja 3,6 metriä leveä. Sähkömoottori sijoitettiin keskelle koehuonetta, jonka etu- ja takaseinä olivat auki.

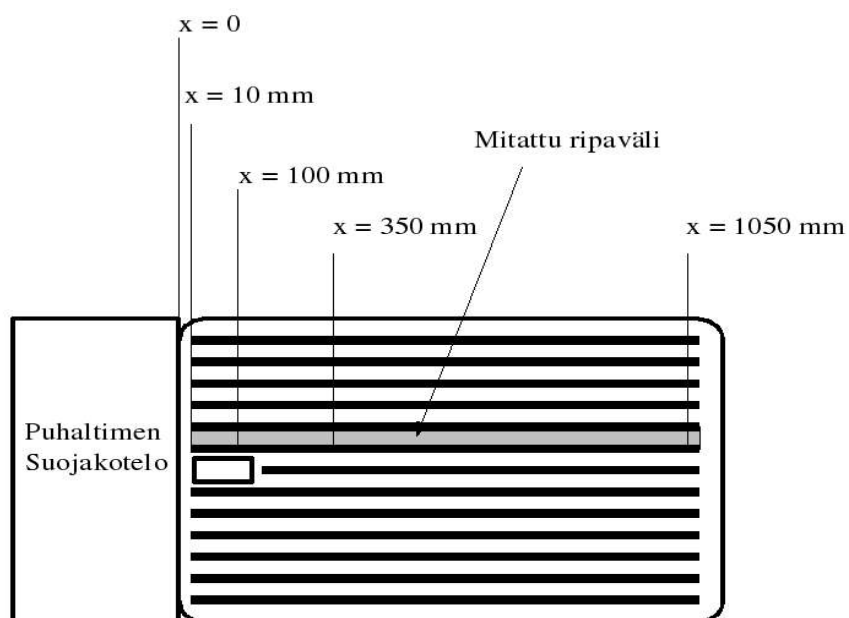
## 2. MITTAUSJÄRJESTELY

Sähkömoottorin päässä oli moottorin oma erillinen jäähdytyspuhallin jolla ilmaa puhallettiin ripaväleihin. Ilmavirtaus siemennettiin vesipisarasumutuksella, jossa noin 3 baarin paineilmalla sumutettiin 5 -10 mikronin pisaroita virtauksen joukkoon. Sumutus tapahtui sähkömoottorin jäähdytyspuhaltimen suojakotelon sisällä, jolloin pisarat sekoittuivat tasaisesti suojakotelosta ulos ripaväliin virtaavaan ilmaan.

Mittausten koordinaatistojärjestelmä valittiin siten, että puhaltimen aksiaalisuunta oli x-koordinaatti, korkeussuunta oli z-koordinaatti ja radiaalinen vaakasuora etäisyys puhaltimesta oli y-koordinaatti. X-koordinaatin nollakohdaksi valittiin puhaltimen suojakotelon jäähdytysripojen puoleinen reuna (ks. kuva 1). Y-suuntaisen koordinaatiston nollakohdaksi valittiin ripavälin pohja ja z-suuntaisen koordinaatiston nollakohdaksi alemman jäähdytysrivin yläpinta jokaisella eri y-arvolla.

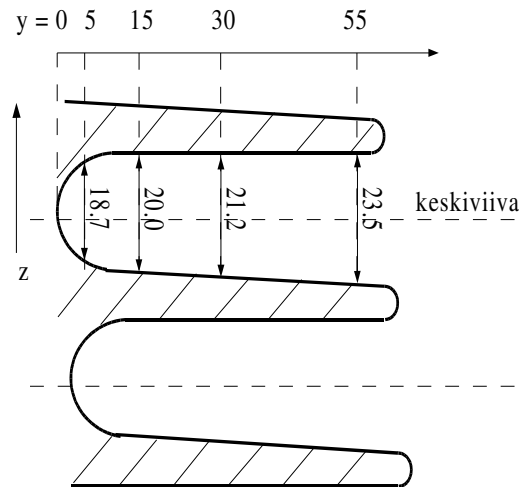
Mittauksissa käytettiin lasersäteiden lähettimen etulinssiä, jonka polttoväli oli 300 mm. Tällaisella polttovälillä varustetun linssin jälkeen lasersäteiden leikkauskohtaan syntyvän ellipsoidin eli mittatilan paksuus on noin 0,2 mm ja pituus noin 3 mm. Mittausten paikkaresoluutio on y-suunnassa siis noin 3 mm ja x- ja z-suunnassa noin 0,2 mm.

Mittaukset tehtiin neljässä kohtaa aksiaalisuunnassa kohdissa  $x = 10$  mm, joka vastaa jäähdytysrivin nousevan etureunan keskikohtaa,  $x = 100$  mm,  $x = 300$  mm ja viimeiseksi  $x = 1050$  mm, joka on lähellä jäähdytysrivin loppupäätä (ks. kuva 1.)



**Kuva 1.** Puhaltimen ripavälin mittauskohdat eri x-koordinaateilla.

Kyseisissä x-kohdissa mitattiin nopeuksia ja turbulenssisuureita eri etäisyydeltä y ripavälin pohjasta mitattuna. Valitut etäisyyden y-koordinaatit olivat  $y = 5 \text{ mm}$ ,  $y = 15 \text{ mm}$ ,  $y = 30 \text{ mm}$  ja  $y = 55 \text{ mm}$  (ks. kuva 2). Lisäksi ripavälin keskiviivalta mitattiin nopeuksia ja turbulenssisuureita lähtien niin läheltä ripavälin pohjaa kuin mahdollista. Käytännössä tämä tarkoitti noin 2,5 millimetrin päästä ripavälin pohjasta.



**Kuva 2.** Ripavälin mittauskohdat ja ripavälin leveys eri  $y$ -koordinaateilla.

Eri  $y$ -koordinaateilla tehdyissä mittauksissa pyrittiin mittaamaan nopeuksia ja turbulenssisuureita niin läheltä rivan pintoja kuin mahdollista. Vaakasuoraa nopeuskomponenttia mitattaessa päästiin lähes rivan pintaan kiinni.  $Z$ -koordinaatin nollakohta vastaa siis tilannetta, josta saatiin ensimmäinen mittausarvo. Tämä piste etsittiin siten, että liikuttiin 0,1 millimetrin askelissa pois päin rivan pinnasta ja ensimmäinen piste, josta saatiin kelvollinen mittaustulos merkittiin nollapisteksi ( $z = 0$ ). Vastaavasti tehtiin ripavälin yläpinnassa, joten yläpinnan vaakasuoran nopeuskomponentin mittausta on yhtä lähellä rivan pintaa kuin alapuolellakin eli noin 0,1...0,2 millimetrin päässä.

Pystysuoran nopeuskomponentin mittausta ei onnistunut aivan rivan pinnasta, vaan ensimmäinen onnistunut mittauspiste saatiin keskimäärin etäisyydellä  $z = 0,75$  mm rivan pinnasta. Tätä suuremmalta etäisyydeltä pystyttiin siis mittaamaan vaakasuoran nopeuskomponentin lisäksi myös pystysuora nopeuskomponentti sekä erilaisia turbulenssisuureita.

### 3. LASER-DOPPLER ANEMOMETRIN MITTAAMAT SUUREET

Laser-Doppler anemometri mittaa virtauksen joukossa olevien yksittäisten pienten siemennyspartikkelien nopeuksia ja nopeusheilahteluja. Oletuksena on, että partikkelit ovat niin pieniä että ne seuraavat virtausta riittävällä tarkkuudella. Yksittäisiä partikkelien nopeuksia mitataan kustakin mittauspisteestä useita tuhansia, jolloin saadun partikkelien nopeuksien jakautuman perusteella voidaan laskea virtauksen nopeutta ja turbulenssia kuvaavia tunnuslukuja. Nopeudet määritetään kahden sädeparin avulla, jolloin pystytään mittaamaan kaksi toisiaan vastaan kohtisuoraa nopeuskomponenttia.

Keskimääräinen nopeus  $V_1$  eli nopeus  $\bar{U}$  on vihreän sädeparin tasossa oleva nopeuskomponentti eli tässä tapauksessa pystysuorassa tasossa oleva nopeuskomponentti jonka suuruus on

$$V_1 = \bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \quad (1)$$

$u_i$  on yksittäisen partikkelin pystysuora nopeuskomponentti

$N$  on mitattujen partikkelien lukumäärä

Nopeuden  $V_1$  turbulenttinen heilahtelunopeus saadaan laskettua yksittäisten nopeuksien ja nopeuden keskiarvon perusteella seuraavasti

$$V_1' = U' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u_i^2}{N} - \bar{U}^2} \quad (2)$$

Vastaavasti keskimääräinen nopeus  $V_2$  on sinisen sädeparin tasossa eli tässä tapauksessa vaakasuorassa tasossa oleva nopeuskomponentti  $\bar{V}$ , joka on kohtisuorassa nopeuskomponenttiin 1 nähden

$$V_2 = \bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i}{N} \quad (3)$$

Nopeuden 2 turbulenttinen heilahtelunopeus on

$$V_2' = V' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N} - \bar{V}^2} \quad (4)$$

$v_i$  = yksittäisen partikkelin vaakasuora nopeuskomponentti

Näiden kahden nopeuskomponentin avulla voidaan laskea kokonaisnopeus vektorisummana jonka itseisarvo on siis

$$V_{tot} = \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} \quad (5)$$

Turbulenssisuureista saadaan mitattua edellä esitettyjen heilahtelunopeuksien lisäksi kahden nopeuskomponentin turbulenssin kineettinen energia

$$TKE = \frac{1}{2} \sqrt{(\bar{U}')^2 + (\bar{V}')^2} \quad (6)$$

sekä Reynoldsin jännitystä kuvaava termi

$$U'V' = \frac{\sum_{i=1}^N u_i v_i}{N} - \bar{U} \bar{V} \quad (7)$$

jossa nopeuskomponenttien heilahtelunopeudet on mitattava samalla ajan hetkellä  $t$ .

Lisäksi laser-Doppler laitteiston mittausohjelmisto laskee suhteen, joka kuvaa tulon  $U'V'$  suhdetta erikseen mitattuihin heilahtelunopeuksien tuloon.

$$C_{coef} = \frac{U'V'}{U' \cdot V'} \quad (8)$$

#### 4. MITTAUSTULOKSET

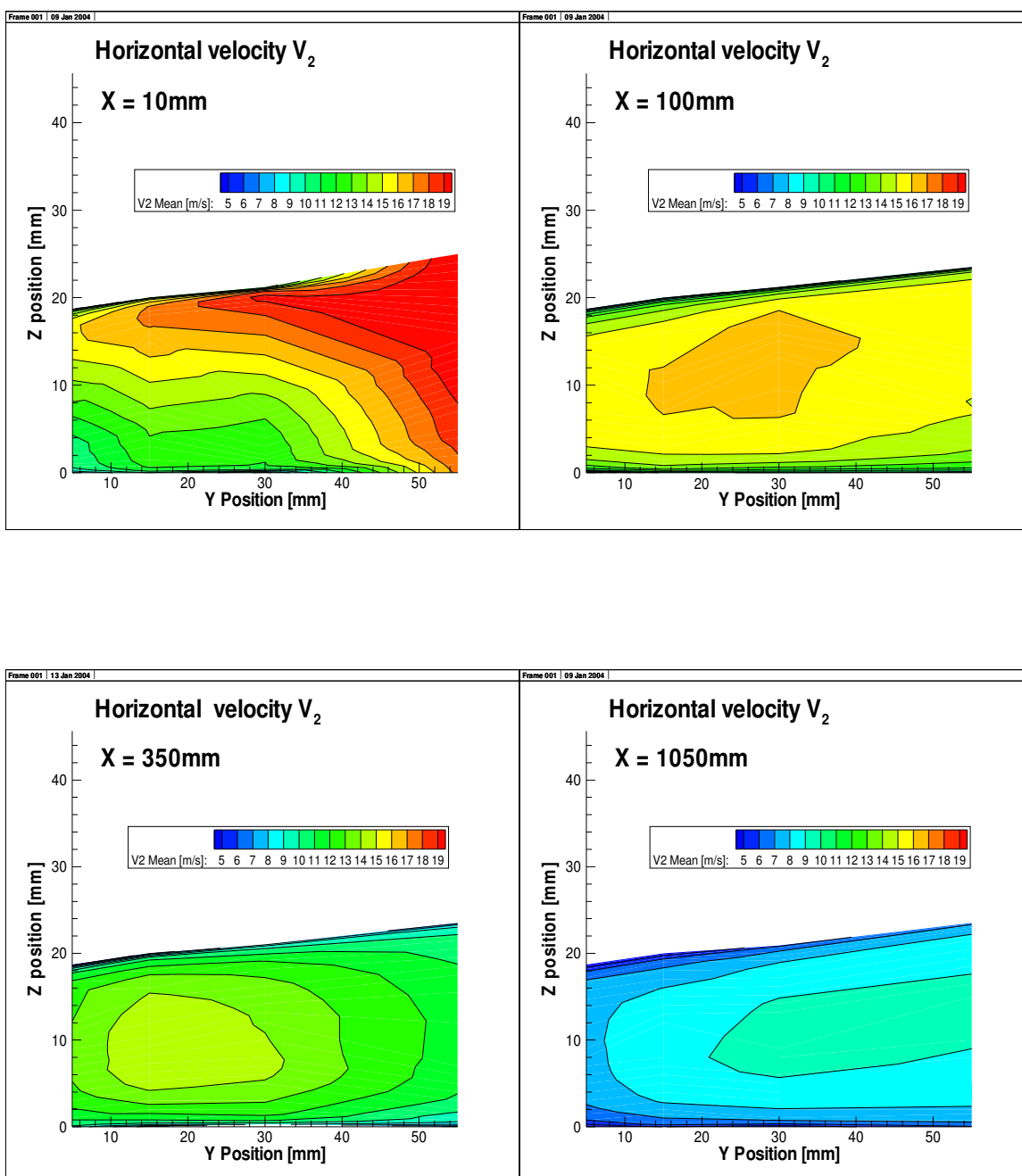
Mittaustulokset on esitetty tasa-arvo käyrinä, joista nähdään mitatun suureen muuttuminen paikan funktiona. Kuvissa esiintyvä koordinaatti Y Position vastaa y-koordinaattia kuvassa 2 ja Z Position on etäisyys ripavälin alapuolisen rivan yläpinnasta. Mittaustulokset on esitetty pitäen vakiona joko y-koordinaattia, jolloin ollaan siis vakio-etäisyydellä ripavälin pohjasta, tai x-koordinaattia jolloin ollaan vakioetäisyydellä rivan alkupäästä.

Ripavälin keskiviivan mittauksissa z-koordinaatti pidettiin vakiona.

Mittaustulosten tasa-arvokäyrät on tehty Genias Graphicsin Tecplot ohjelmalla, joka interpoloi mitattujen neljän profiilin perusteella väliarvoja tasa-arvokäyrien piirtämistä varten.

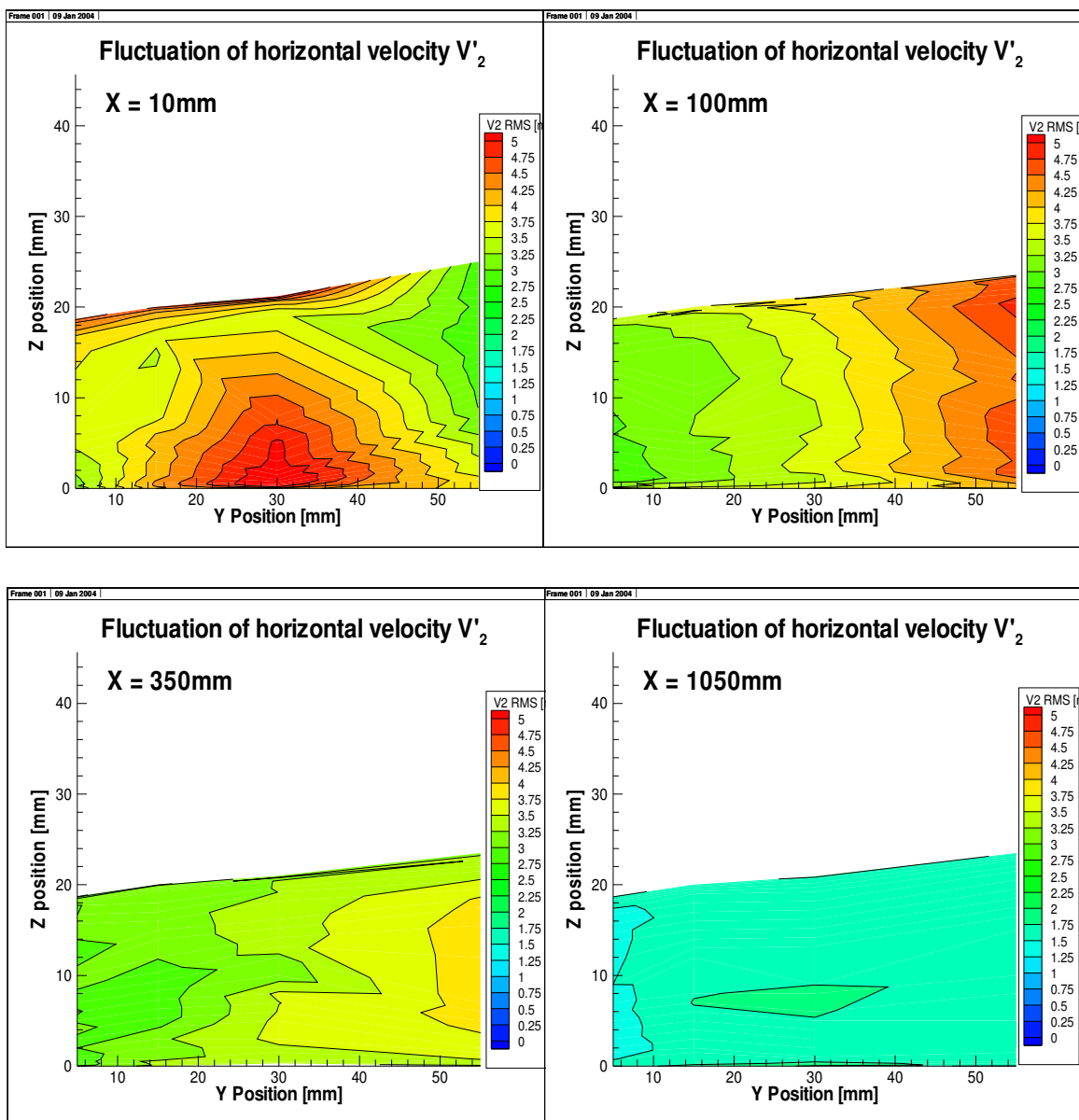
## 4.1 X-koordinaatti vakiona

Vaakasuora nopeuskomponentti ripavälissä eri etäisyyksillä X

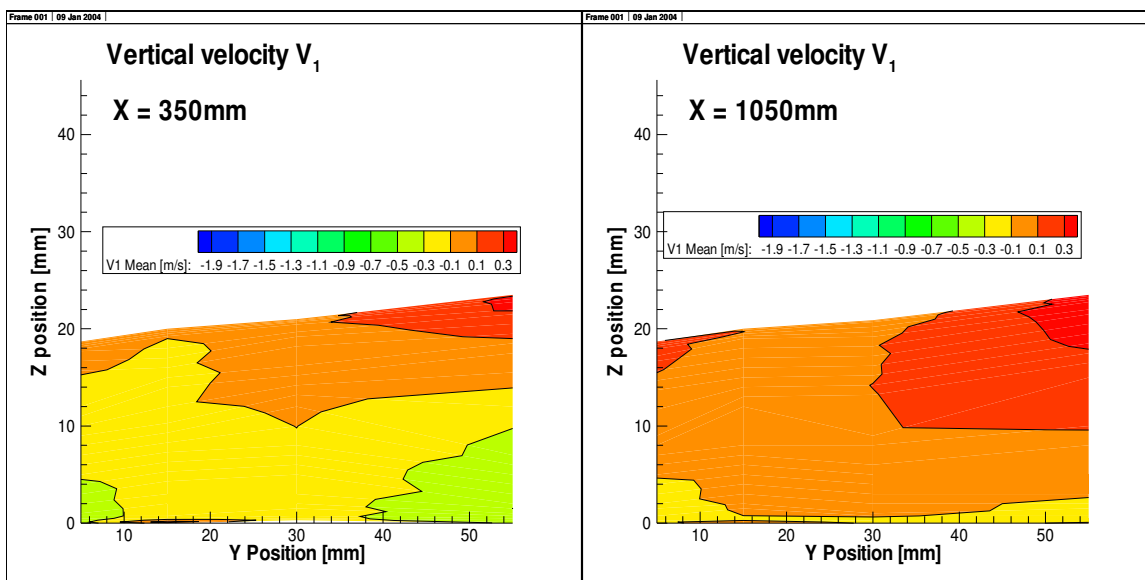
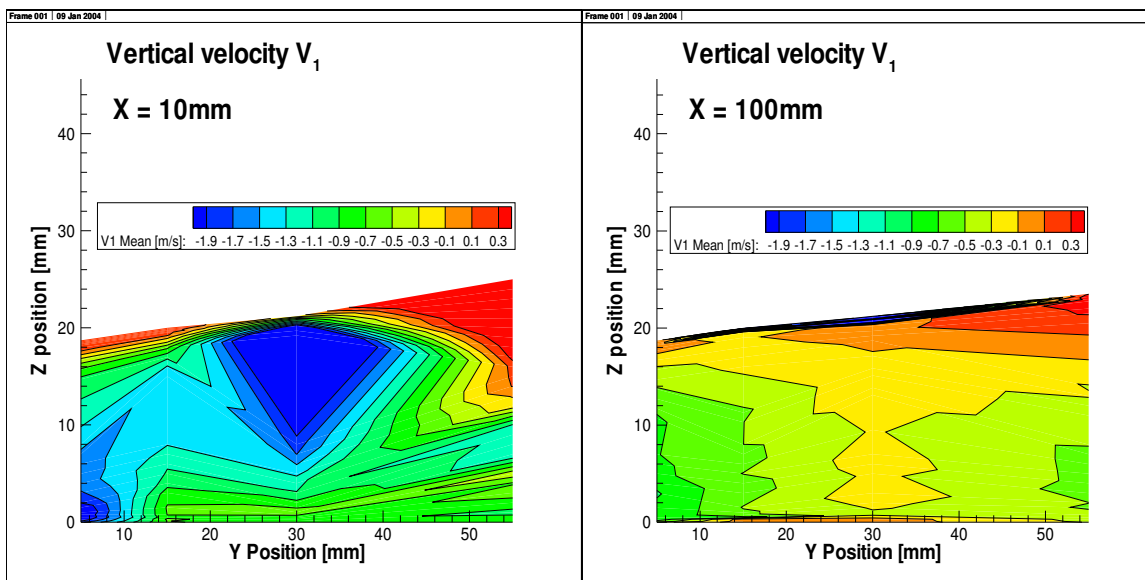




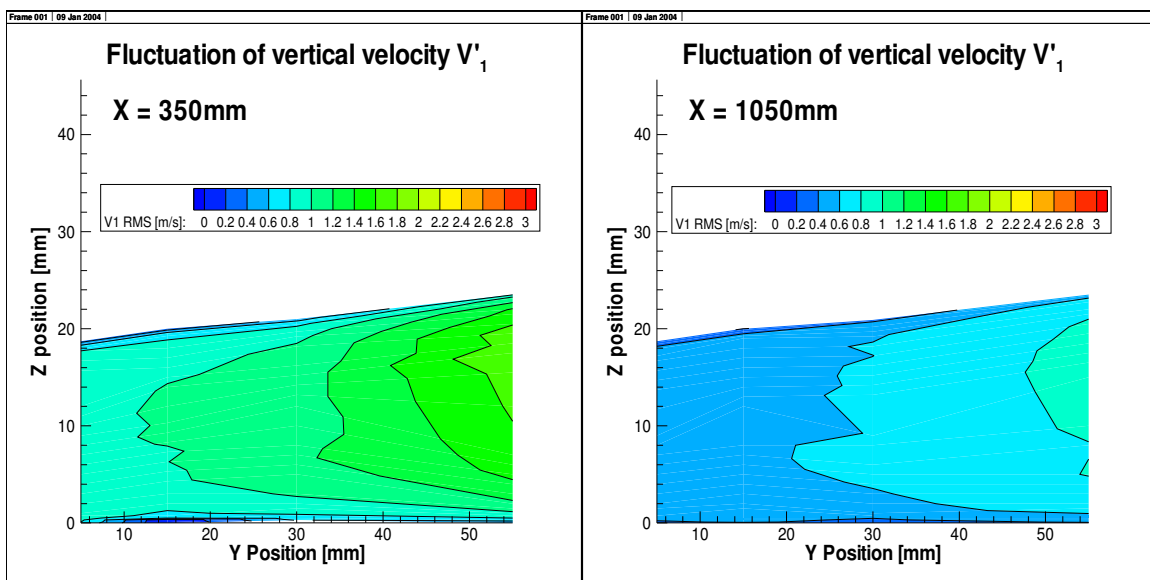
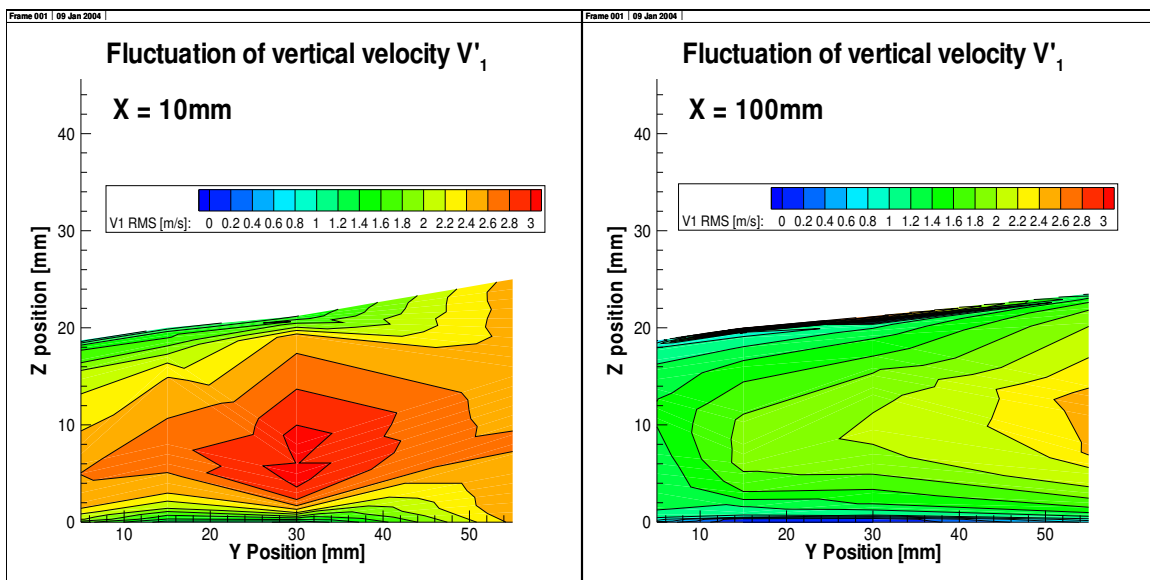
## Vaakasuoran nopeuskomponentin heilahtelu ripavälissä eri etäisyyksillä X



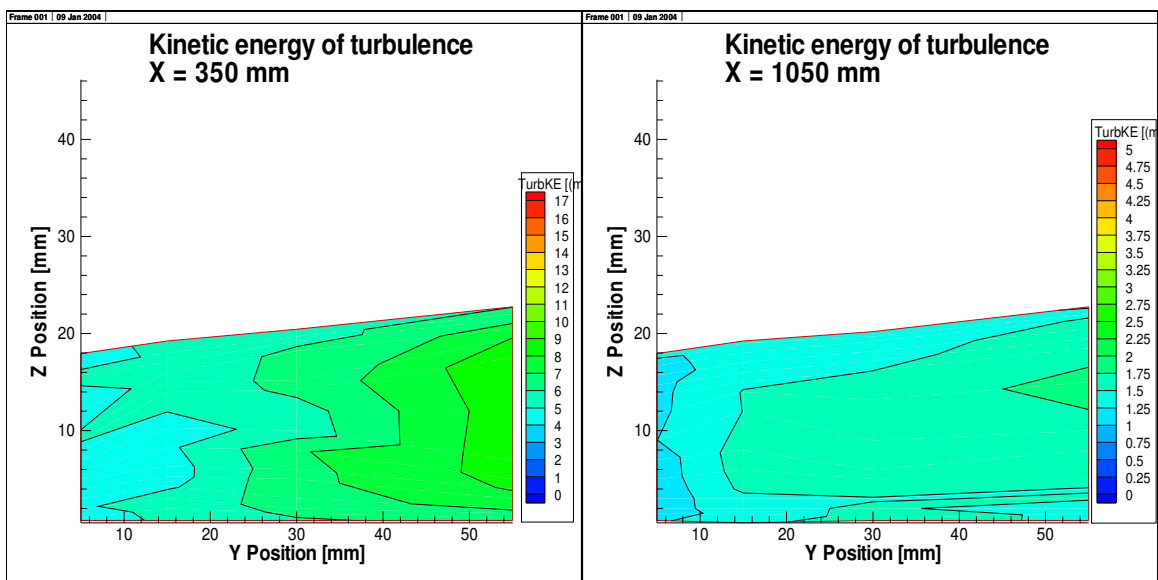
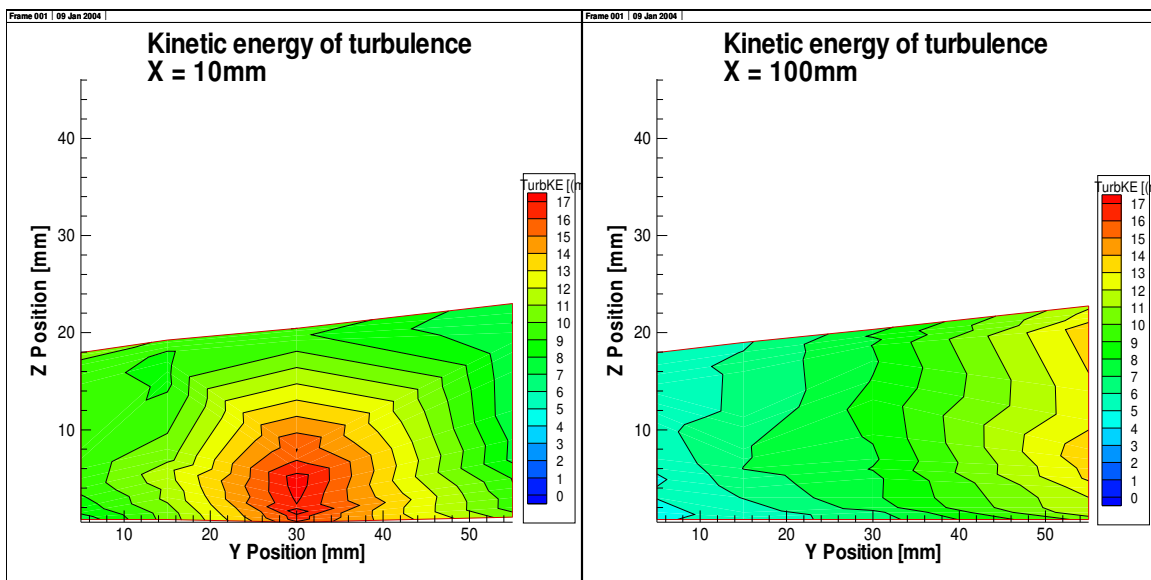
## Pystysuora nopeuskomponentti ripavälissä eri etäisyyksillä X



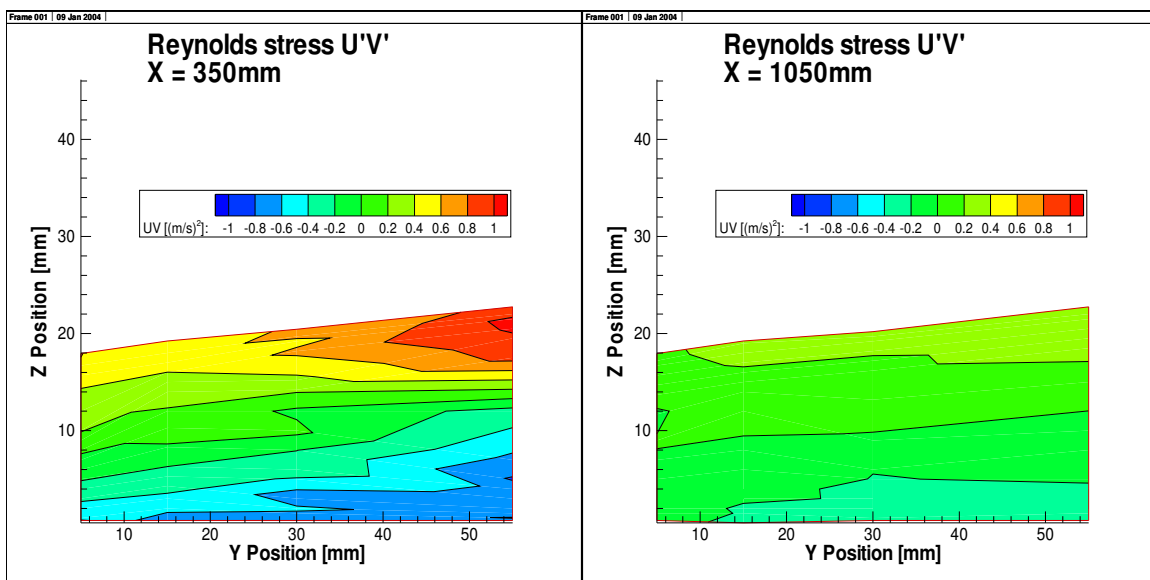
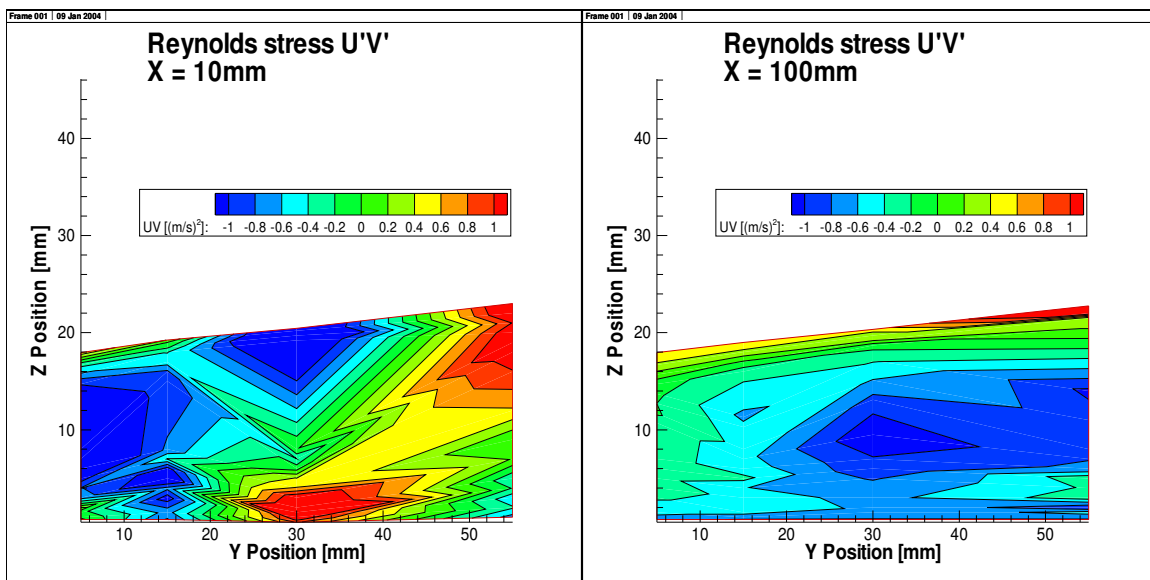
## Pystysuoran nopeuskomponentin heilahtelu eri etäisyyksillä X



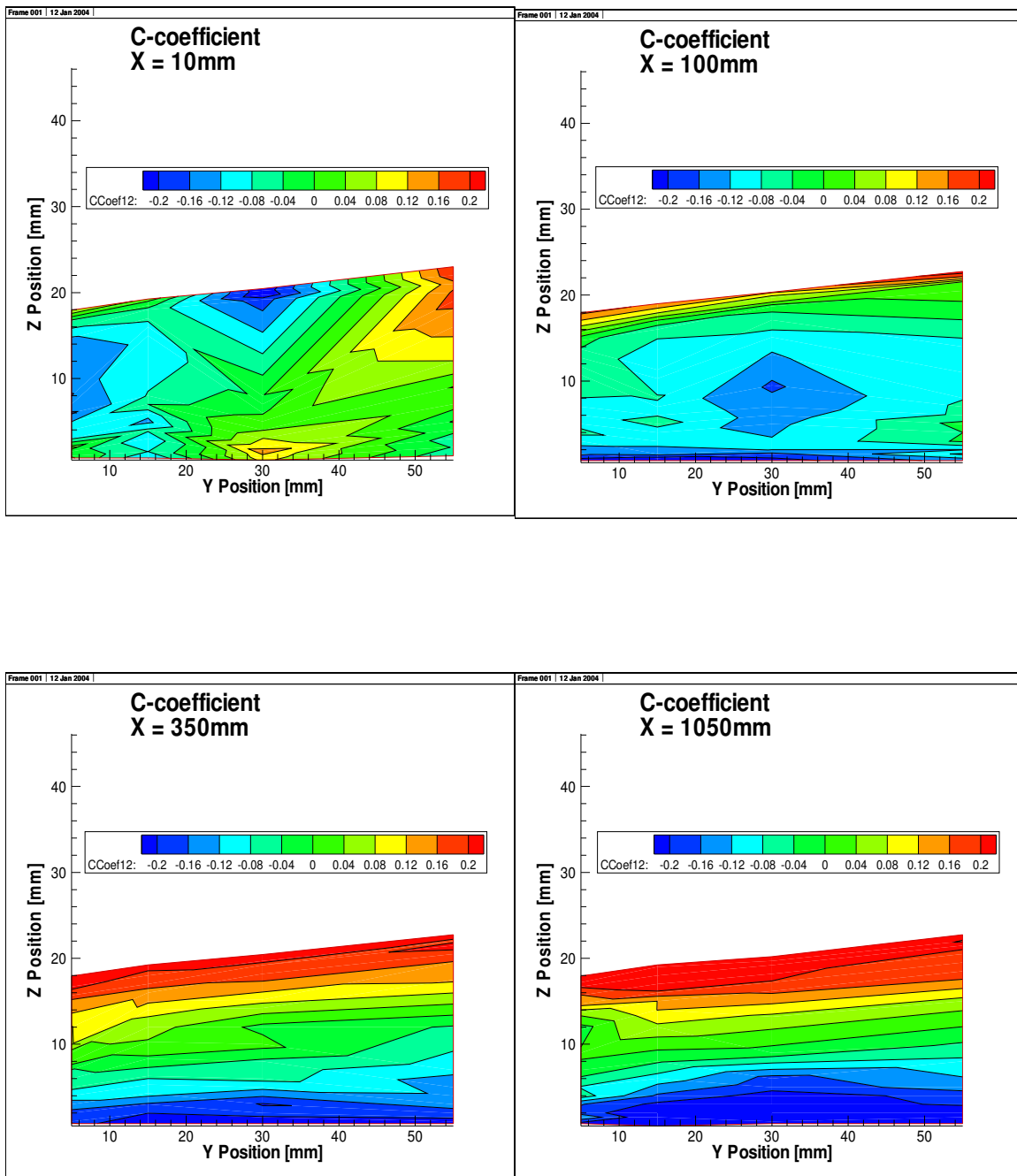
## Kahden nopeuskomponentin turbulenssin kineettinen energia eri etäisyyksillä X



## Kahden nopeuskomponentin Reynoldsin jännitys $U'V'$ eri etäisyyksillä X

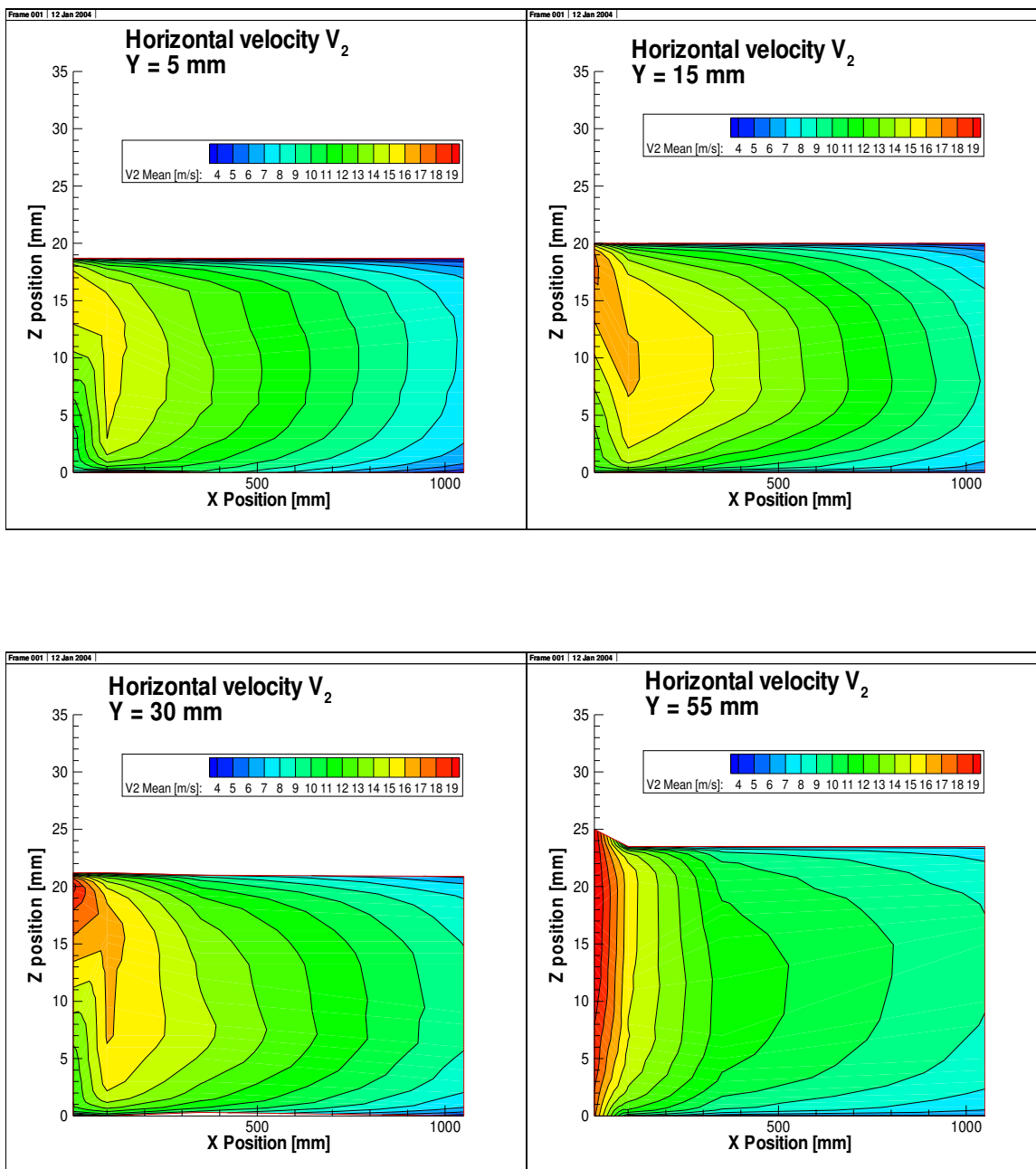


## Nopeusheilahtelujen C-kerroin eri etäisyyksillä X

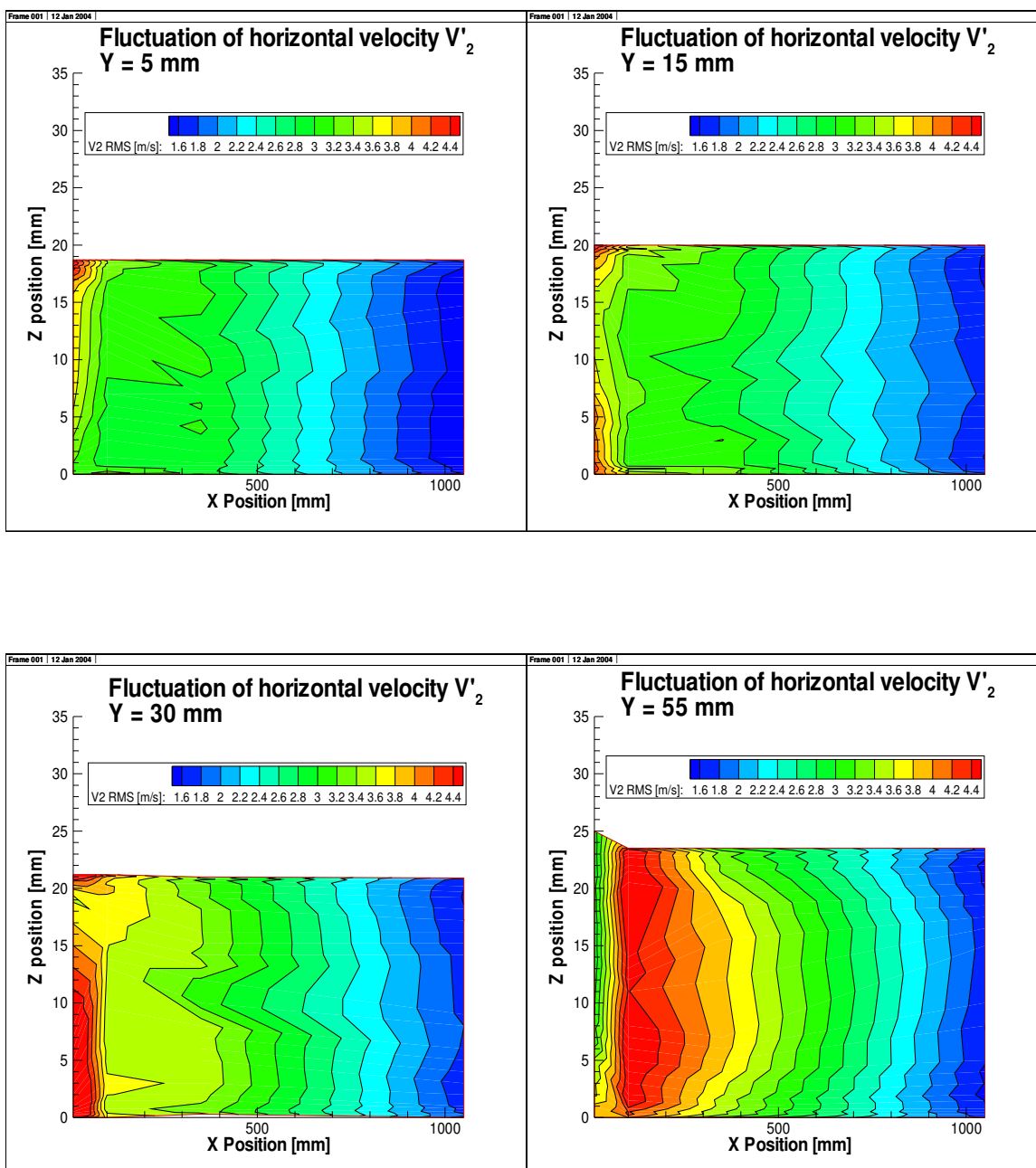


## 4.2 Y-koordinaatti vakiona

Vaakasuora nopeuskomponentti eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna

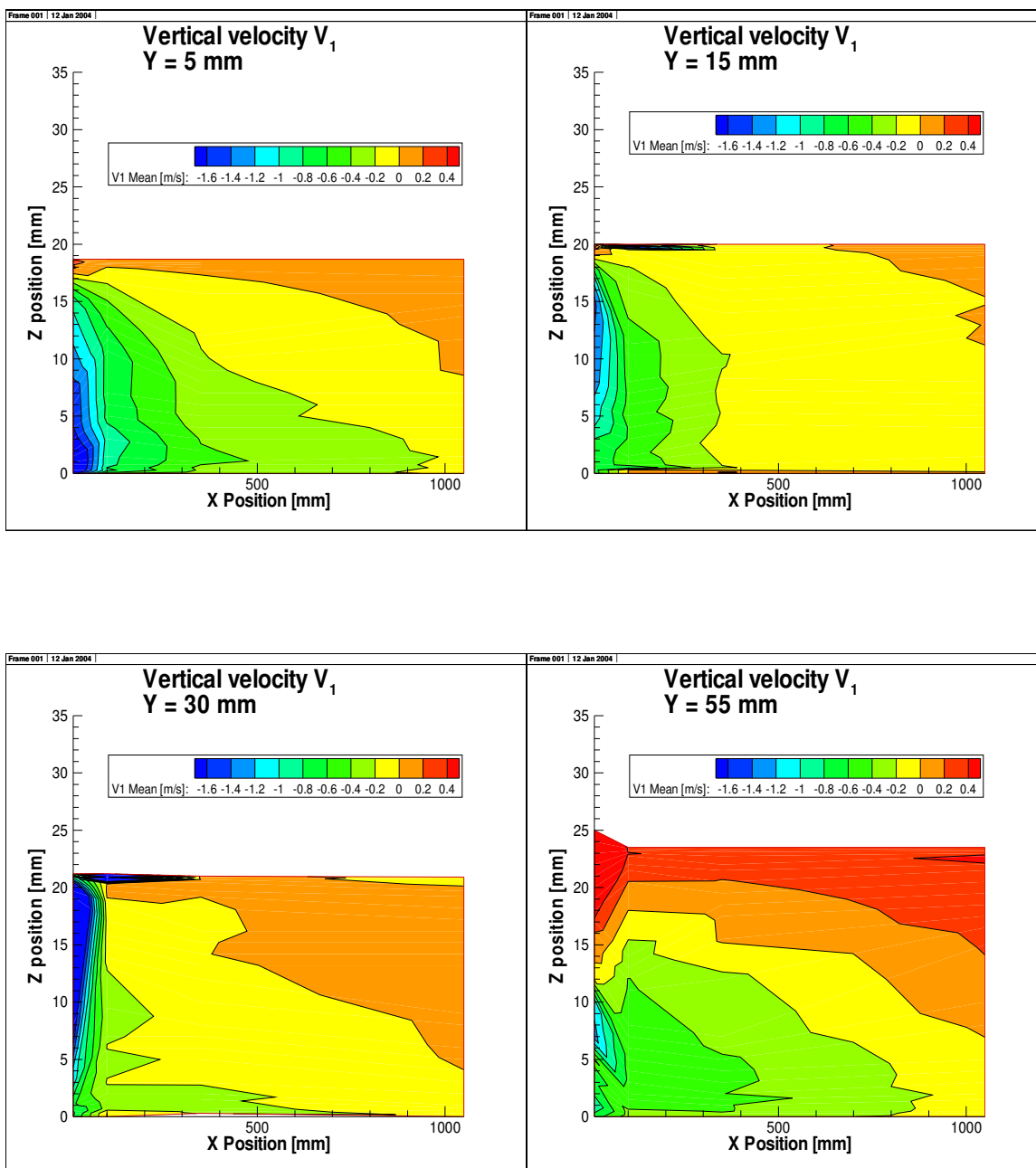


**Vaakasuoran nopeuskomponentin heilahtelu eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna**

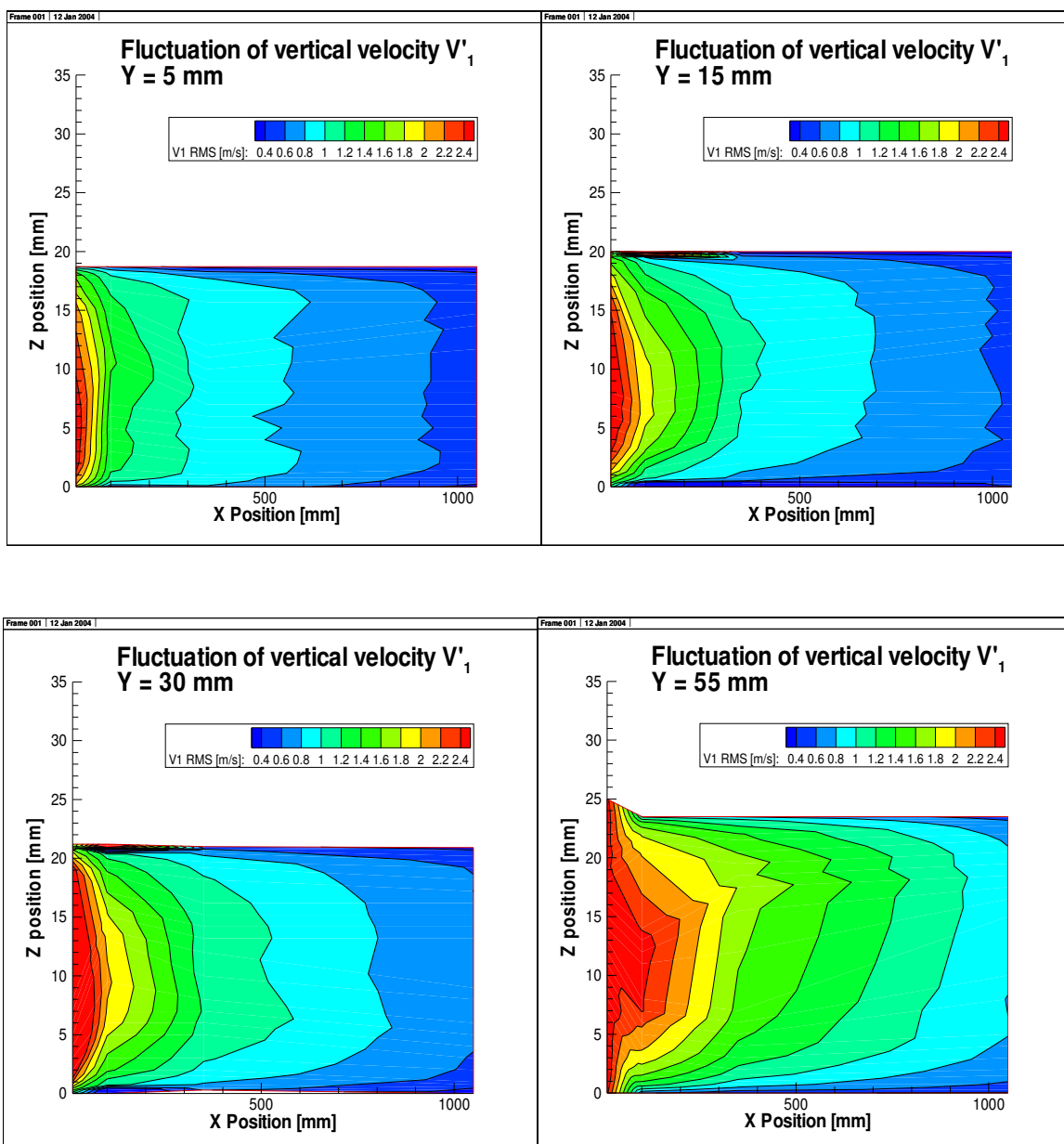




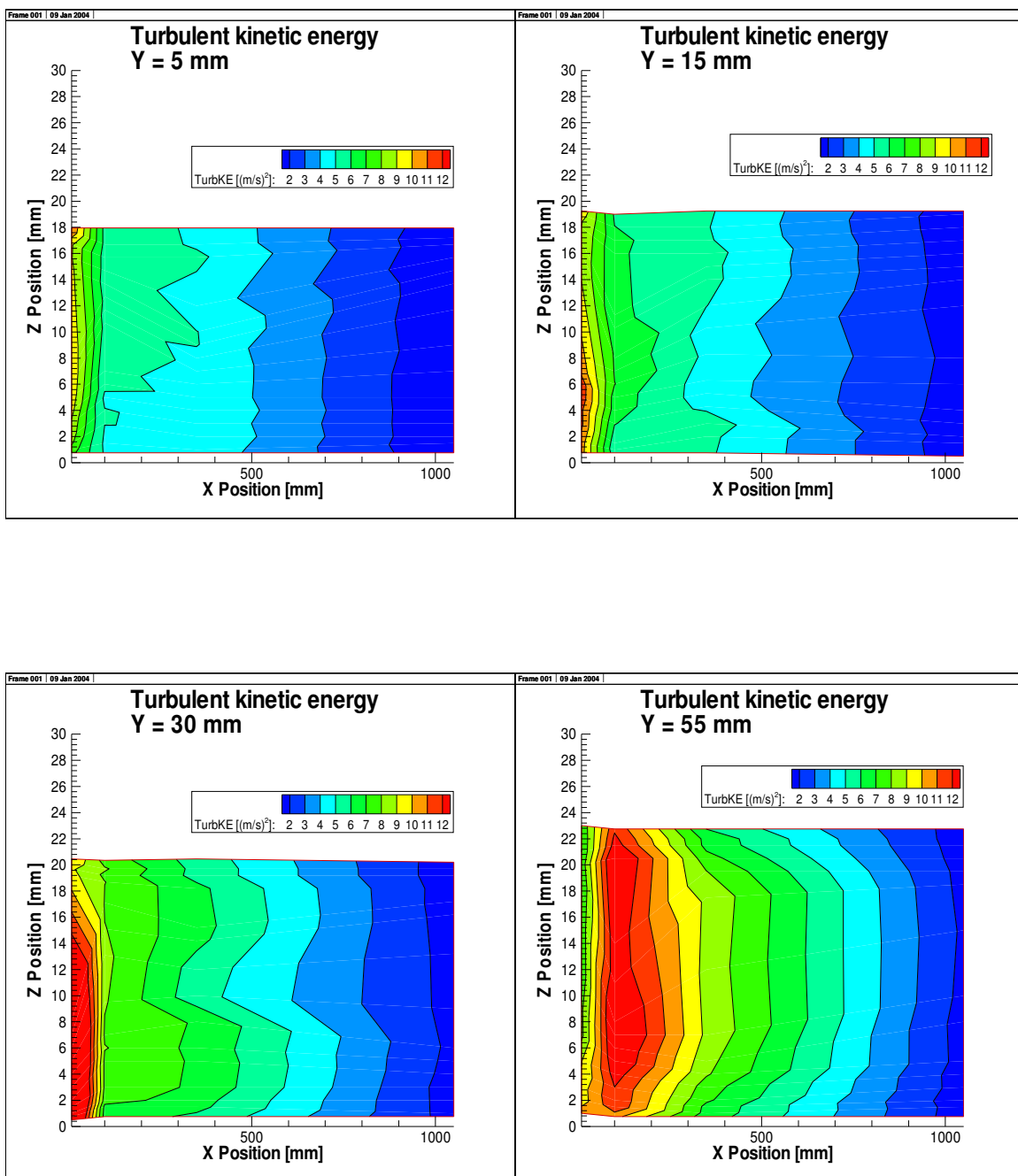
Pystysuora nopeuskomponentti eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna



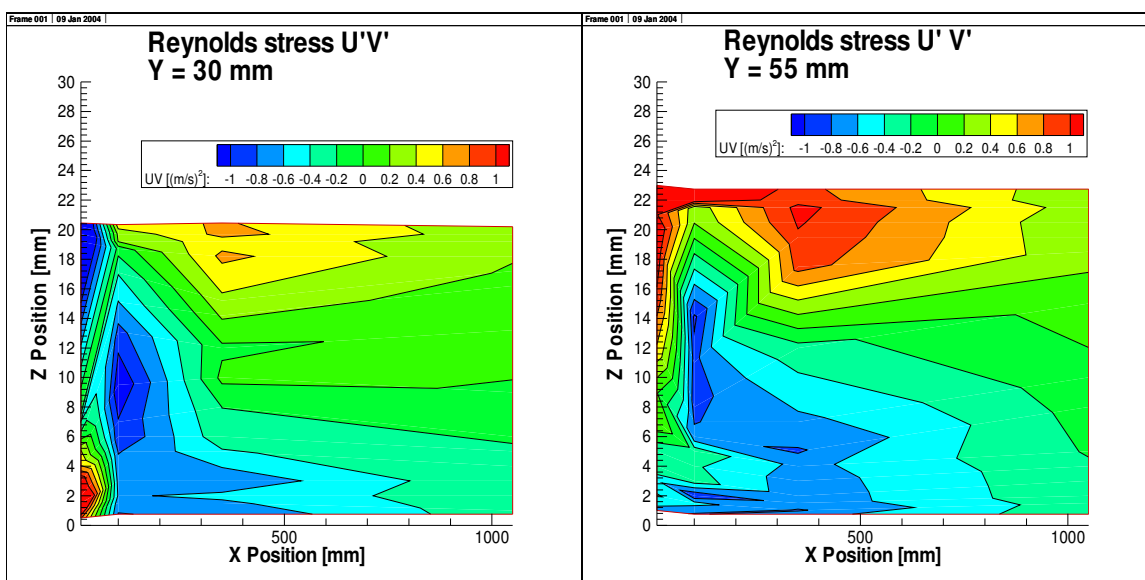
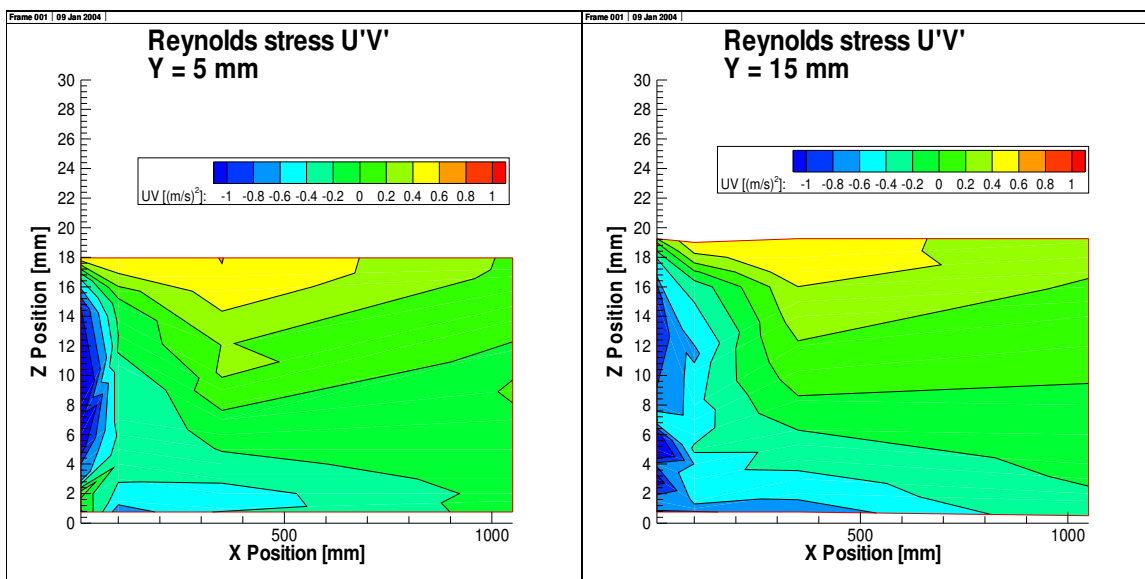
**Pystysuoran nopeuskomponentin heilahtelu eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna**



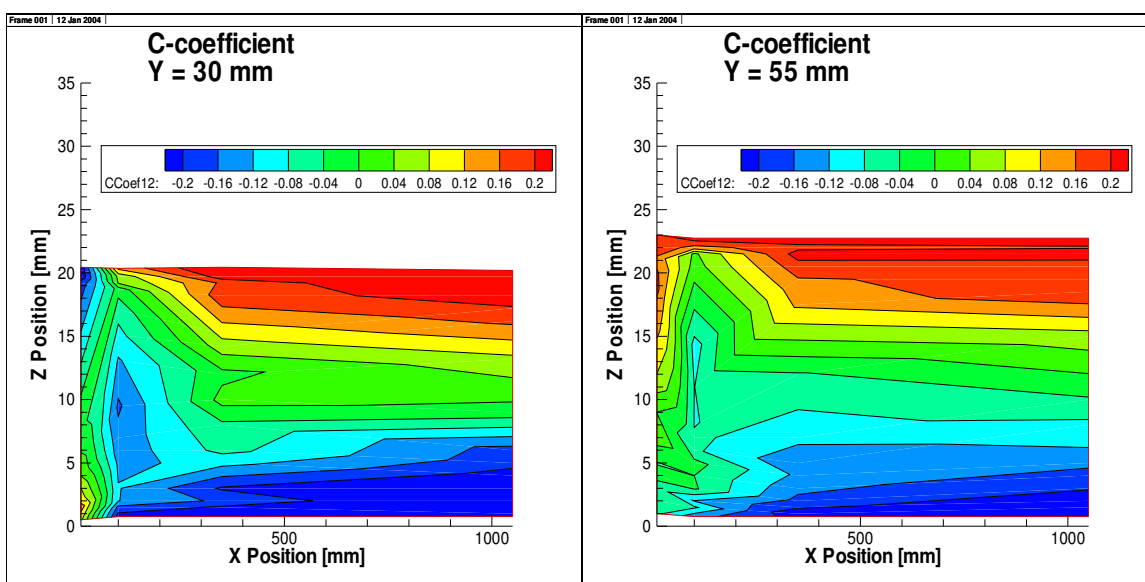
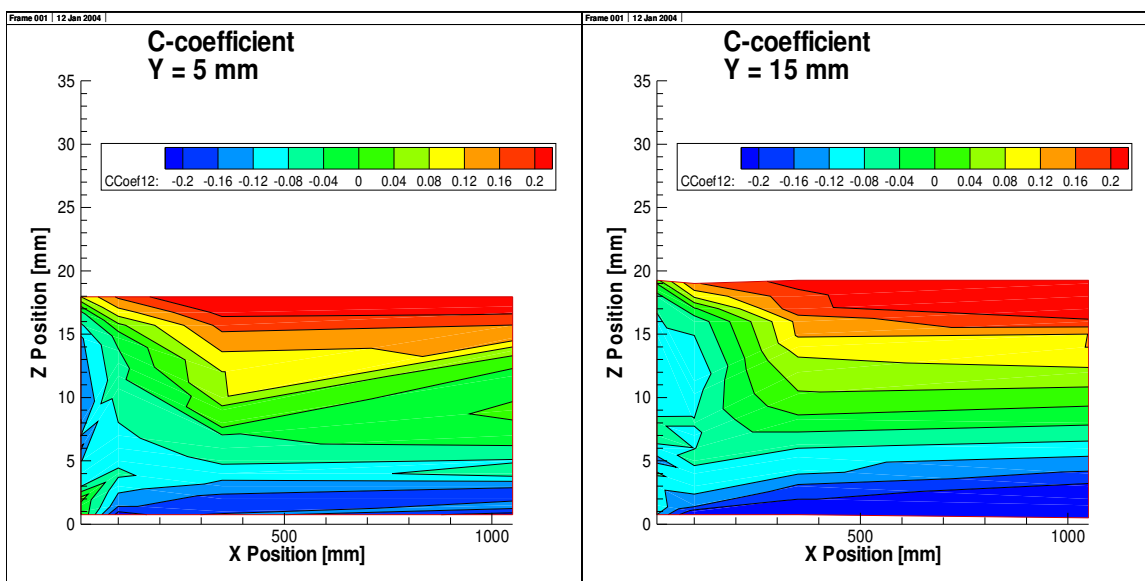
Kahden nopeuskomponentin turbulenssin kineettinen energia eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna



Kahden nopeuskomponentin Reynoldsin jännitys  $U'V'$  eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna

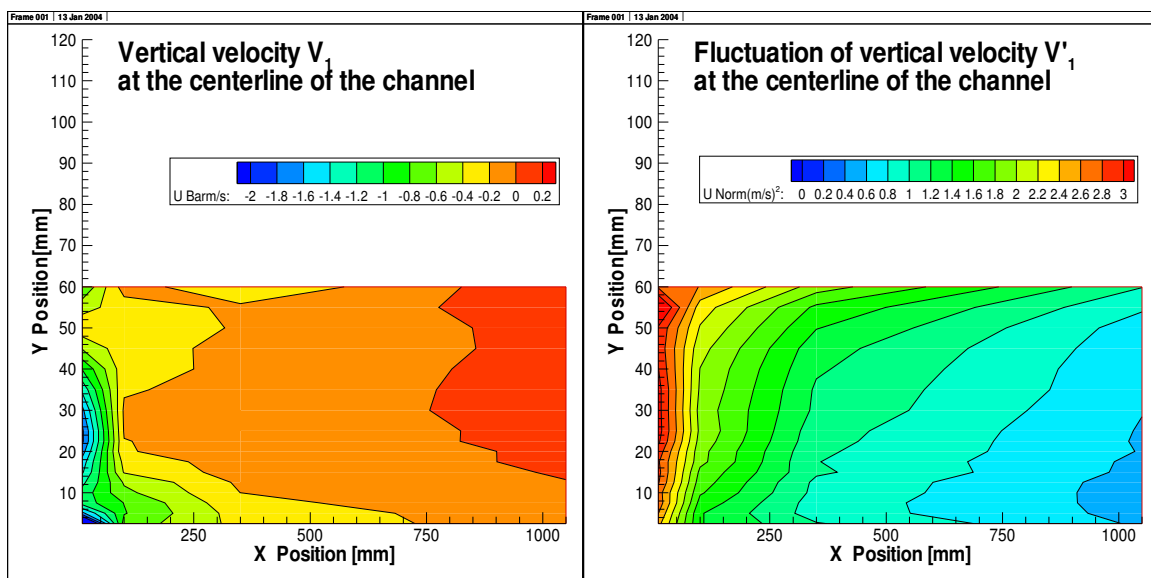
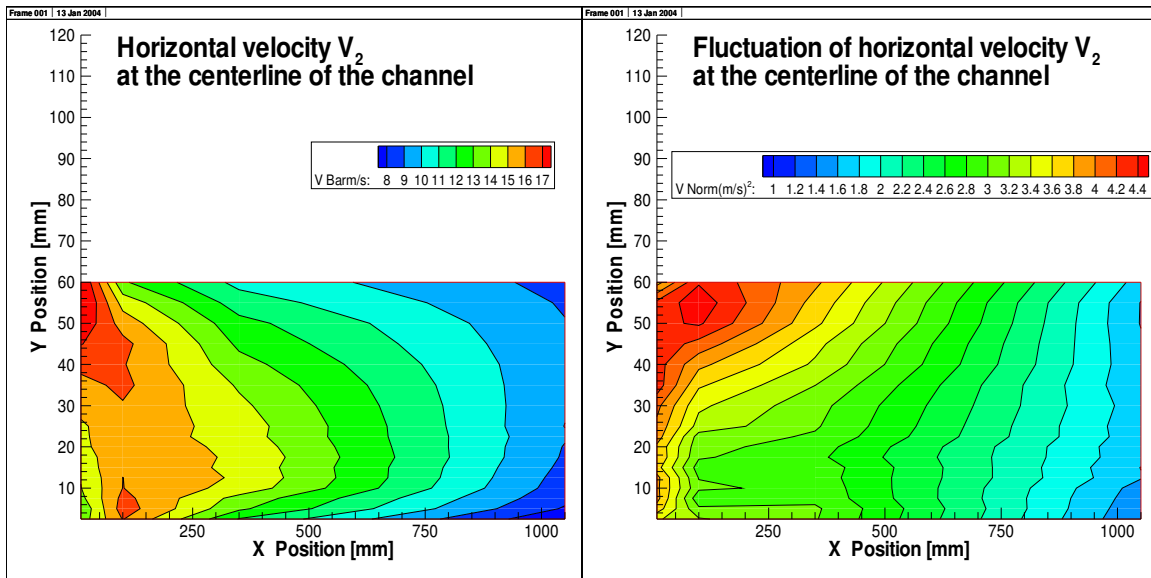


# Nopeusheilahtelujen C-kerroin eri etäisyyksillä Y ripavälin pohjasta mitattuna



### 4.3 Mittaukset ripavälin keskellä

Nopeuskomponentit ja heilahtelunopeudet ripavälin keskellä eri etäisyyksillä X



Turbulenssin kineettinen energia TKE, Reynoldsin jännitys  $U'V'$  ja C-kerroin ripavälin keskellä

